УДК 519.872.8

Исследование адекватности моделей самоподобного трафика, используемых для оценки качества обслуживания в сети

Благов А.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, СГАУ, Московское шоссе 34, Самара, 443086, Россия

e-mail: alex_ssauprof@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена вопросу исследования качества обслуживания в информационных сетях при помощи имитационных моделей. Автором предлагается метод построения и анализа двумерного распределения очереди в заданной системе массового обслуживания, входным потоком в которую является трафик. Метод апробируется на разработанных модификациях моделей телекоммуникационного трафика: “Input M/G/∞” и “On-Off Sources”. Предложенный в статье подход построения двумерного распределения очереди в заданной системе массового обслуживания может использоваться для исследования одного из параметров качества обслуживания в сети – вариации задержки (джиттера).

Ключевые слова: самоподобный трафик, моделирование трафика, модель “Input M/G/∞”, модель “On-Off Sources”, вариация задержки (джиттер), система массового обслуживания.

1. Введение

Проблема прогнозирования поведения трафика в сетях телекоммуникаций является особенно значимой в связи с колоссальным развитием информационных сетей. До середины 90-х годов теоретическую базу для проектирования систем распределения информации обеспечивала теория телетрафика. Однако было установлено (W. Leland и W.Wilinger в 1994 г., M. Crovella в 1996 г.), что потоки в сетях передачи пакетов данных имеют несколько иную, чем принято в классической теории телетрафика, структуру - самоподобную [1]. Практически актуальными представляются задачи построения имитационной модели самоподобного сетевого трафика для её использования в программах имитационного моделирования при исследованиях характеристик моделей реальных сетей, проводимых на стадии проектирования. Кроме того, хорошая модель может служить не только для имитации реального трафика, но и выявлять его структуру, параметры порождающих трафик источников, ситуацию в сети, по которой трафик распространялся и т.д. В настоящее время исследователями предлагаются большое количество различных моделей самоподобного сетевого трафика [2, 3, 4]. Как правило, в качестве проверки адекватности и работоспособности той или иной модели предлагается соответствие различных статистических характеристик, таких как параметр Херста (описывающий степень самоподобия) [5], математическое ожидание, автокорреляционная функция и одномерное распределение трафика. Реже встречаются оценки средней и максимальной длины очереди [3]. Однако во многих случаях, например, при исследовании качества обслуживания в сети, в частности, при исследовании такого показателя как вариация задержки – джиттер, большее значение имеет оценка характеристик других порядков.

Целью статьи является представление методики проверки адекватности моделей самоподобного трафика, заключающейся в исследовании двумерного распределения очереди, создаваемой трафиком в заданной системе массового обслуживания.

2. Краткое описание моделей и исследуемого материала

Модели сетевого трафика “Input M/G/∞” и “On-Off Sources” построены следующим образом: предположим, что в системе с дискретным временем $t \in I_{-\infty}$ информация передаётся пакетами одинакового размера, а трафик $Y = (..., Y_{-1}, Y_0, Y_1, ...)$ - это случайный процесс дискретного времени, где Y_t - количество пакетов, прибывших в некоторую точку за временной шаг $[t-1,\ t)$. Пакеты эти производятся множеством независимых друг от друга источников. В модели “On-Off Sources” источников заданное конечное число *N*, и каждый из них то производит пакеты, то на некоторое время замолкает, а в модели “Input M/G/∞” число источников бесконечно, но каждый производит пакеты в течение одного конечного промежутка времени, а потом замолкает.

В модели “Input M/G/∞” новые источники возникают в системе в каждом временном окне, образуя пуассоновский поток с параметром λ:

$$\Pr\{A_t = k\} = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}, \qquad k \in Z_+, \tag{1}$$

где A_t - это число новых источников трафика, появившихся в системе во временном окне t. Каждый источник имеет конечное время работы в системе, после истечения которого он исчезает из системы. Время работы источников является случайной величиной τ, имеющей распределение с «тяжёлым хвостом»:

$$\Pr\{\tau = k\} = \begin{cases} y,\ k = 1, \\ \dfrac{A}{(k+x)^{\beta+2}}, \quad k = 2, 3\ldots \end{cases}, \tag{2}$$

где x и y – подлежащие определению константы, A – нормировочная константа, а β - параметр, связанный с коэффициентом самопододия соотношением $H=1-\beta/2$ [6].

Кроме того, каждый источник имеет определенную скорость генерации пакетов $S(n)$, в общем случае $S(n)=1$. В усовершенствованной модели скорость генерации пакетов определяется следующим образом:

$$\Pr\{S = k\} = \frac{\Pr\{Y_t = k\} - \sum_{m=2}^{k} p_m \Pr\left\{\sum_{n=1}^{m} S_n = k\right\}}{p_1},$$

где Y_t - это телекоммуникационный трафик, представленный как случайный процесс, значение которого в каждом временном окне равно суммарной интенсивности генерации информации всеми находящимися в данный момент в системе источниками:

$$Y_t = \sum_{k=-\infty}^{t} \sum_{i=1}^{A_t} S_{k,i}(t-k) I(\tau_{k,i} > t-k).$$

Коэффициент p_k определяется соотношениями:

$$p_0 = \Pr\{Y_t = 0\},$$

$$\Pr\{Y_t = 1\} = p_1 \Pr\{S = 1\},$$

и т.д. Подробный вывод приводится в работе [2].

Модель “Input M/G/∞” хорошо работает для генерации глобальных (TCP трафика) трасс [6].

В модели “On-Off Sources” N - независимых источников. Каждый из них имеет два состояния: состояние активности (*ON*), в котором источником генерируются данные, и состояние молчания (*OFF*), в котором источник ничего не производит. Эти периоды попеременно сменяют друг друга. Вероятность застать индивидуальный источник в активном состоянии и в состоянии молчания есть:

$$P_{ON} = \frac{M\tau}{M\tau + M\upsilon}, \qquad P_{OFF} = \frac{M\upsilon}{M\tau + M\upsilon},$$

где τ - длительность *ON* периодов источников, является реализацией случайного процесса, имеющего распределение с тяжелым хвостом (2), а υ - длительность *OFF* периодов, имеющего распределение Пуассона: $\Pr\{\upsilon = k\} = e^{-\lambda}\dfrac{\lambda^k}{k!}, \quad k \in Z_+$.

Как и в модели “Input M/G/∞” каждый источник имеет скорость генерации пакетов, определенную для каждого ON периода. Модель “On-Off Sources” неплохо работает для генерации локальных сетей (Ethernet трассы) [7]. В усовершенствованной модификации модели “On-Off Sources” – *OFF* период имеет пуассоновское распределение времени:

$$P_{OFF} = \frac{M\upsilon}{M\tau + M\upsilon} = \frac{\lambda}{M\tau + \lambda}, \quad \lambda = \frac{P_{OFF}}{P_{ON}} M\tau .$$

В качестве исследуемого материала используем как трассы трафика локальных сетей (трассы Ethernet трафика), так и глобальных (трассы TCP трафика). Глобальные TCP трассы: dec-pkt-1.tcp, dec-pkt-2.tcp, dec-pkt-3.tcp, dec-pkt-4.tcp, LBL-PKT-4.TCP, LBL-PKT-5.TCP [8] – представлены трассами часовой записи трафика между Digital Equipment Corporation (DEC – американская компьютерная компания) и остальным Интернетом (первые две) и трассой часовой записи трафика между Lawrence Berkeley Laboratory (национальная лаборатория имени Лоуренса в Беркли) и остальным Интернетом (последняя). Обозначим их как: ***глоб.1***, ***глоб.2***, …, ***глоб.6*** – соответственно. Трассы локальных Ethernet сетей представлены трассами часовой записи трафика из коллекции корпорации Bellcore (компания, производящая средства связи, и ведущая научные исследования в этой области): BC-pAug89.TL, BC-pOct89.TL [8], а именно трассами трафика в опорной магистрали корпоративной локальной сети Bellcore. Обозначим их: ***лок.1*** и ***лок.2***.

Помимо указанных выше широко известных трасс, возьмем для исследования еще одну Ethernet трассу часовой записи в магистрали локальной сети Metromax-Самара (ГК «MetroMax» компания, предоставляющая телекоммуникационные услуги), снятую в ноябре 2007 г.. Обозначим её ***лок.3***.

Каждая трасса представляется процессом с дискретным временем, значение которого в определенный момент времени - сумма размеров всех пакетов, прибывших в данном временном окне (шаге дискретизации) [2].

Более подробное описание моделей, их модификаций, включающих аппроксимацию автокорреляционной функции (АКФ), и экспериментов приводится в работах [2,6,7].

3. Построение и анализ двумерного распределения очереди в заданной системе массового обслуживания

Близкое сходство таких характеристик натурного и смоделированного трафика, как одномерное распределение и АКФ, дает некоторую оценку адекватности предложенных моделей [2,7]. Однако во многих случаях, например, при исследовании вариации задержки – джиттера [9], большее значение имеет, двумерное распределение очереди, которое создается данным трафиком при прохождении через систему массового обслуживания (СМО). В такой СМО интенсивность обслуживания примем равным среднему количеству поступающих требований (в нашем случае выборочному среднему), деленному на коэффициент ρ, который будем варьировать в пределах от 0 до 1 в различных испытаниях. При этом ожидающие требования образуют очередь Q_t (в момент времени t).

Данная характеристика, двумерное распределение очереди, вводится для получения вероятностной оценки разброса времени прохождения пакетного телекоммуникационного трафика через требуемый сегмент информационной сети. Оценка двумерного распределения очереди Q_{t_i} определяется следующим образом:

$$\Pr\left\{Q_{t_1} = a, Q_{t_2} = b\right\} = \Pr_{t_1,t_2}\left(a, b\right) = \Pr_{t_1-t_2}\left(a, b\right), \qquad (3)$$

где a и b – меняются от 0 до некоторой максимальной длины очереди $Q_{\max}$.

Исследуем близость таких двумерных распределений очереди, используя натурный и смоделированный трафик как входные потоки в СМО.

По результатам проведенных экспериментов с исследуемыми трассами с различными значениями $\Delta t = t_1 - t_2$ (в нашем случае мы брали равным *10, 100* и *1000*) и коэффициента ρ (от *0,3* до *0,8)* можно отметить относительно близкие результаты для трафика глобальных трасс при использовании модели “Input M/G/∞” и для трафика локальных трасс при использовании модели “On-Off Sources” (рис. 1, 3, 4). При моделировании трафика локальных трасс с использованием модели “Input M/G/∞” наблюдаются большие расхождения (рис. 2).

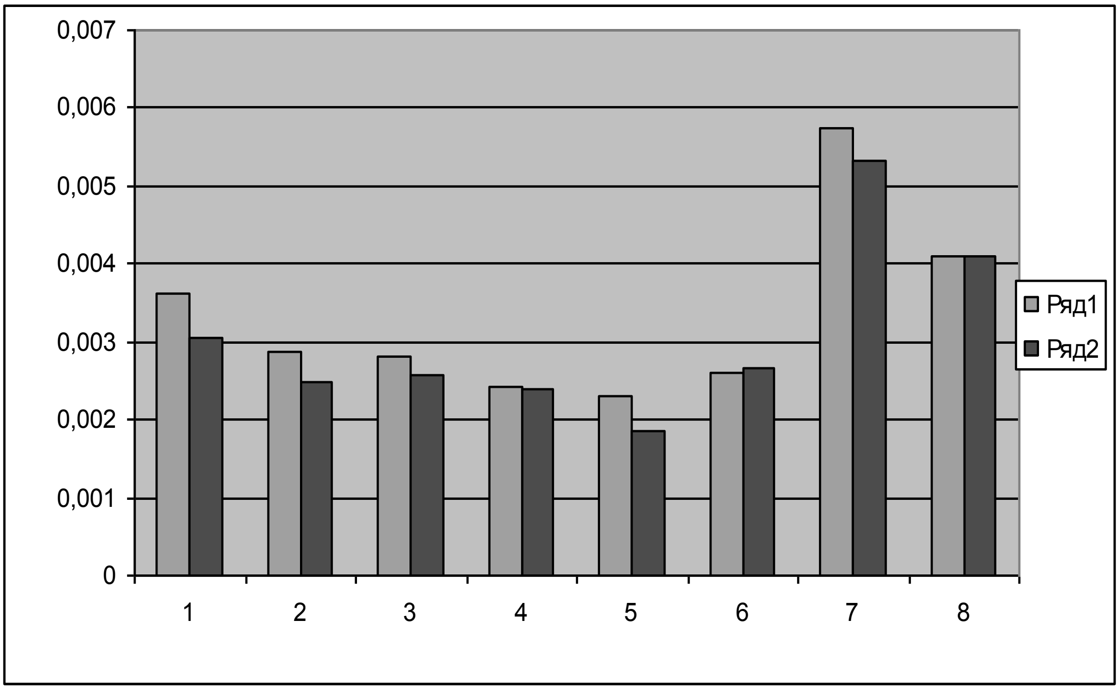

Рис. 1. Графическое сравнение элементов первого ряда двумерного распределения очереди трафика натурной и смоделированной трассы **глоб.1** (ρ =0,4 Δt = 1000)

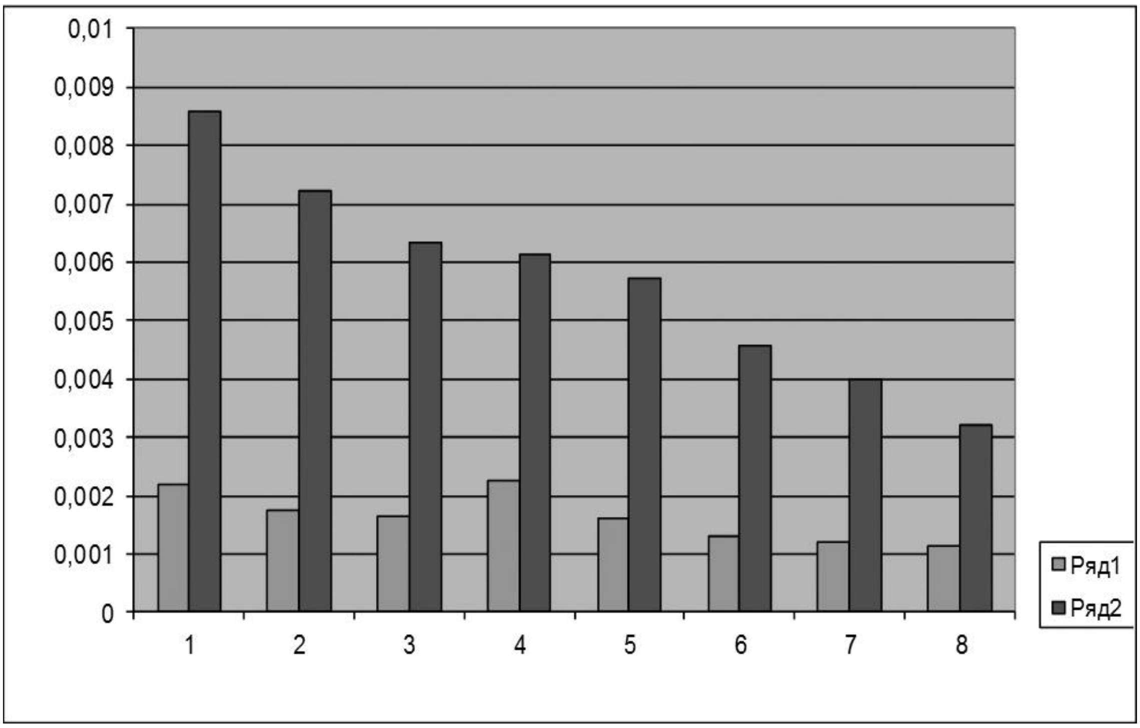

Рис. 2. Графическое сравнение элементов первого ряда двумерного распределения очереди трафика натурной и смоделированной трассы ***лок.1*** (ρ *=0,4* Δt *= 1000*)

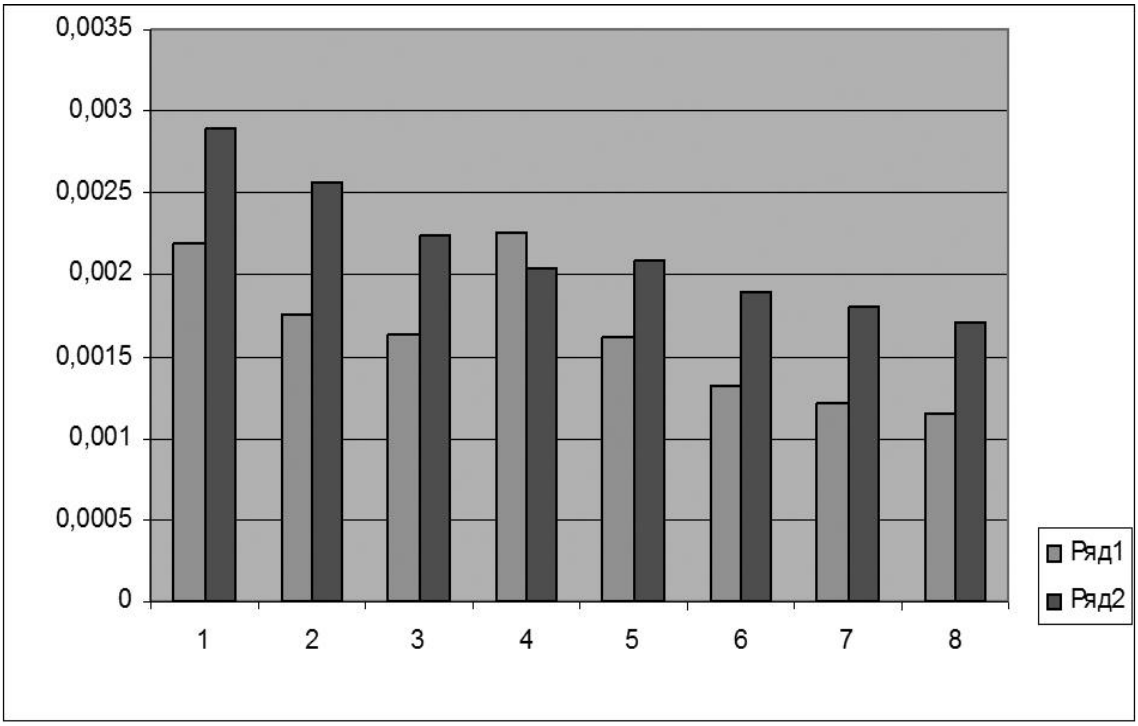

Рис. 3. Графическое сравнение элементов первого ряда двумерного распределения очереди трафика натурной и смоделированной трассы ***лок.1*** (ρ *=0,4* Δt *= 1000*)

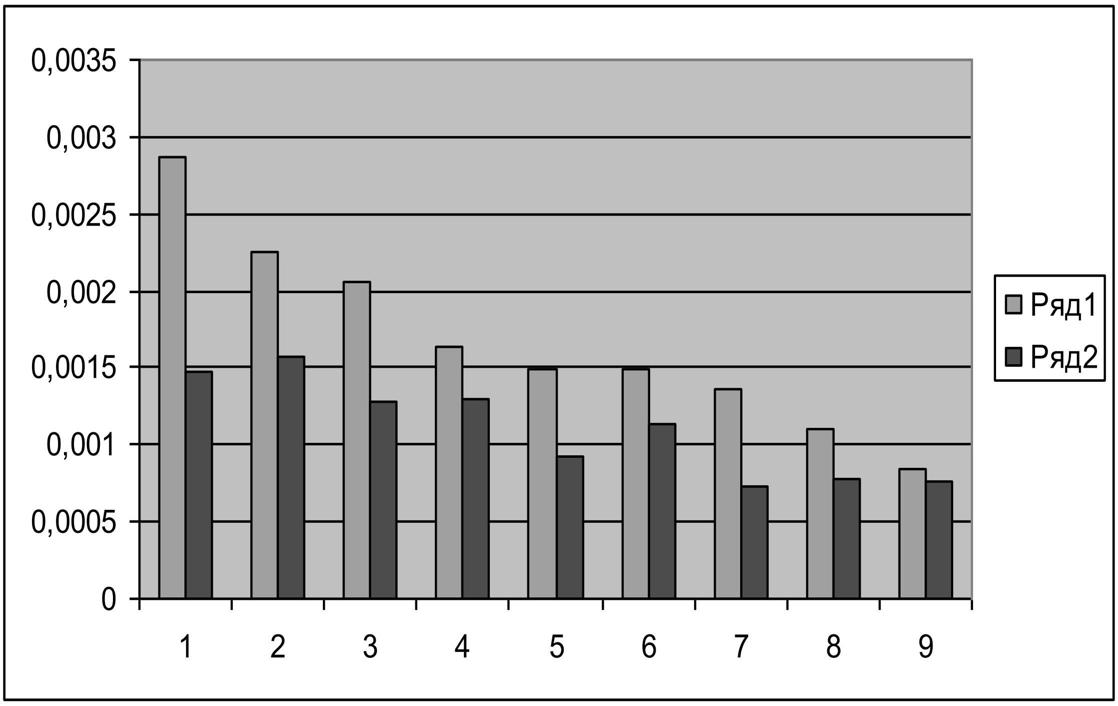

Рис. 4. Графическое сравнение элементов первого ряда двумерного распределения очереди трафика натурной и смоделированной трассы ***лок.2*** (ρ =0,4 Δt = 1000)

Для более строгой оценки осуществим проверку гипотезы H_0 о том, что два двумерных распределения очереди при использовании натурного и смоделированного трафиков подчиняются одному и тому же распределению, т.е. подобны. Осуществим проверку данной гипотезы по критерию Колмогорова-Смирнова.

Статистика данного критерия определяется как:

$$D_{n,m} = \sup_x \left| F_n^{(1)}(x) - F_m^{(2)}(x) \right|,$$

где $F_n^{(1)}(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(x_i^{(1)} \le x \right)$ – эмпирическая функция распределения, построенная по первой выборке (в нашем случае по одномерному распределению натурного трафика), а $F_m^{(2)}(x)=\sum_{i=1}^{m}\left(x_i^{(2)}\le x\right)$ – эмпирическая функция распределения, построенная по второй выборке (в нашем случае по одномерному распределению трафика смоделированного).

Обозначим через H_0 гипотезу о том, что две исследуемые выборки подчиняются одному и тому же распределению случайной величины. Тогда для введённой статистики:

$$\forall t>0:\ \lim_{n,m\to\infty}\mathbf{Pr}\left(\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}\le t\mid H_0\right)=K(t),$$

где $K(t)$ – функция Колмогорова.

Если статистика $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ превышает квантиль распределения Колмогорова $t_{1-\alpha}$, то нулевая гипотеза H_0 отвергается с вероятностью ошибки α. Иначе гипотеза принимается на уровне значимости α.

Полученные результаты проверки гипотезы по критерию Колмогорова-Смирнова запишем в таблицы 1, 2, 3.

В таблице 1 показаны значения статистики $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ при проведении экспериментов над глобальными трассами с использованием модификаций модели “Input M/G/∞”. В данном случае гипотеза принимается как на уровне значимости *0,05*, так и на *0,1* лишь при использовании модификации модели “Input M/G/∞” с аппроксимацией АКФ.

Таблица 1 – Значение статистик двумерных распределений очереди в СМО по критерию Колмогорова-Смирнова (моделирование трафиков по «Input M/G/∞»). Эксперименты над глобальными трассами

Трасса, нагрузка СМО и интервал времени в двумерном распределении			**значение статистики** $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ **(**модельный трафик по базовой "Input M/G/∞"**)**	**значение статистики** $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ **(**модельный трафик по разработанной модификации "Input M/G/∞", без аппроксимации АКФ**)**	**значение статистики** $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ **(**модельный трафик по разработанной модификации "Input M/G/∞", с аппроксимацией АКФ**)**
глоб.1	**ρ=0,4**	**Δ=100**	1,748	0,183	0,131
		Δ=100	1,884	0,201	0,139
	ρ=0,8	**Δ=100**	3,707	0,705	0,615
		Δ=100	3,726	0,757	0,674
глоб.2	**ρ=0,4**	**Δ=100**	2,593	0,011	0,009
		Δ=100	2,706	0,010	0,009
	ρ=0,8	**Δ=100**	7,056	0,551	0,388
		Δ=100	7,063	0,559	0,405
глоб.5	**ρ=0,4**	**Δ=100**	2,736	0,236	0,147
		Δ=100	2,679	0,239	0,142
	ρ=0,8	**Δ=100**	2,144	1,223	0,954
		Δ=100	2,141	1,135	0,679
глоб.6	**ρ=0,4**	**Δ=100**	2,758	0,254	0,097
		Δ=100	2,699	0,304	0,070
	ρ=0,8	**Δ=100**	4,898	1,451	1,117
		Δ=100	4,394	1,563	1,188

В таблице 2 показаны значения статистики $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ при проведении экспериментов над локальными трассами с использованием модификаций модели “Input M/G/∞”. Гипотеза при этом отвергается для всех модификаций.

Таблица 2 – Значение статистик двумерных распределений очереди в СМО по критерию Колмогорова-Смирнова (моделирование трафиков по «Input M/G/∞»).

Эксперименты над локальными трассами

Трасса, нагрузка СМО и интервал времени в двумерном распределении			**значение статистики** $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ (модельный трафик по базовой “Input M/G/∞”)	**значение статистики** $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ (модельный трафик по разработанной модификации “Input M/G/∞”, без аппроксимации АКФ)	**значение статистики** $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ (модельный трафик по разработанной модификации “Input M/G/∞”, с аппроксимацией АКФ)
лок.1	**ρ=0,4**	**Δ=10**	3,620	1,762	*1,703*
		Δ=10	3,619	1,695	*1,705*
	ρ=0,8	**Δ=10**	5,443	3,231	*3,021*
		Δ=10	5,296	3,159	*3,163*
лок.2	**ρ=0,4**	**Δ=10**	3,562	1,702	*1,704*
		Δ=10	3,473	1,940	*2,039*
	ρ=0,8	**Δ=10**	6,085	2,110	*1,988*
		Δ=10	6,379	2,097	*2,102*
лок.3	**ρ=0,4**	**Δ=10**	6,923	2,244	*2,304*
		Δ=10	6,656	2,361	*2,321*
	ρ=0,8	**Δ=10**	7,039	2,329	*2,486*
		Δ=10	6,924	2,804	*2,575*

В таблице 3 показаны значения статистики $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ при проведении экспериментов над локальными трассами с использованием модификаций модели “On-off Sources ”. В данном случае гипотеза принимается как на уровне значимости *0,05*, так и на *0,1* при использовании модификации модели с аппроксимацией АКФ.

Таблица 3 – Значение статистик двумерных распределений очереди в СМО по критерию Колмогорова-Смирнова (моделирование трафиков по «On-Off Sources»)

Трасса, нагрузка СМО и интервал времени в двумерном распределении			**значение статистики** $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ **(**модельный трафик по базовой “On-off Sources”)	**значение статистики** $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ **(**модельный трафик по разработанной модификации “On-off Sources” без аппроксимации АКФ**)**	**значение статистики** $\sqrt{\frac{nm}{n+m}}D_{n,m}$ **(**модельный трафик по разработанной модификации “On-off Sources” с аппроксимацией АКФ**)**.
Aug	**ρ=0,4**	**Δ=100**	2,437	0,140	0,077
		Δ=100	2,571	0,148	0,086
	ρ=0,8	**Δ=100**	5,223	0,691	0,604
		Δ=100	5,083	0,668	0,629
Oct	**ρ=0,4**	**Δ=100**	3,983	0,548	0,173
		Δ=100	3,898	0,420	0,250
	ρ=0,8	**Δ=100**	3,342	0,156	0,110
		Δ=100	3,023	0,139	0,091
Met-ro-max	**ρ=0,4**	**Δ=100**	7,532	0,928	0,209
		Δ=100	7,251	0,701	0,280
	ρ=0,8	**Δ=100**	7,621	1,561	0,412
		Δ=100	7,523	1,261	0,423

По полученным результатам оценки двумерного распределения очереди в заданной СМО можно сделать выводы о преимуществах разработанной модификации модели “Input M/G/∞” над базовой моделью при моделировании глобальных трасс, и преимуществе разработанной модификации модели “On-off Sources” при моделировании трасс локальных.

Двумерное распределение очереди в заданной СМО позволяет получить некоторую вероятностную оценку минимального и максимального разброса времени прохождения пакета через определенный узел телекоммуникационной сети. Узел в данном случае имитировала СМО. Другими словами, с помощью заданной СМО моделируется система, работающая в дискретном времени, позволяющая получить вероятностную оценку джиттера в сети.

4. Выводы

Исследование адекватности моделей самоподобного трафика должно иметь комплексный подход. Помимо сравнительного анализа по степени самоподобия и таких статистических характеристик как одномерное распределение и АКФ [2, 6] бывает важно исследование статистик больших порядков. Предложенный в данной статье метод построения и анализа двумерного распределения очереди в заданной СМО может служить для демонстрации практической необходимости имитации трафика, являясь при этом достаточно простым в реализации и логически подходящим к такому объекту как телекоммуникационный трафик. Имеет место применение подобного метода по отношению к имитационным моделям самоподобного трафика для исследования вариации задержки – джиттера [9].

Полученные результаты позволяют использовать разработанные имитационные модели для генерации трафика с заданными статистическими характеристиками. Предложенный анализ очереди в заданной СМО дает вероятностную оценку джиттера в телекоммуникационных сетях. Он может быть использован при проектировании сетей, а также разработке методов распределения пропускной способности каналов и уменьшения потерь информационных пакетов, для систем, где важно качество обслуживания.

Библиографический список

1. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях. М.: Радиотехника, 2003. 480 с.
2. Благов А.В., Привалов А.Ю. Модификации моделей типа «входная M/G/∞» и «On-Off источники» для имитационного моделирования самоподобного телекоммуникационного трафика. М.: Электронный журнал «Труды МАИ», 2010. № 39. URL: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=14802
3. Mondragon R.J., Arrowsmith D.K., Pitts J.M. Chaotic map for traffic modeling and queuing analysis. Netherlands: Performance evaluation, vol. 43, 2001. Pp. 223-240.
4. Громов Ю.Ю,. Земской Н.А., Иванова О.Г., Лагутин А.В. Фрактальный анализ и процессы в компьютерных сетях Тамбов: Изд-во технич. ун-та, 2007. - 65с.
5. Park K., Willinger W., Wiley Ed. Self-similar Network Traffic and Performance Evaluation. New-York: John Wiley & Sons Inc., 2000. 556 p.

6. Privalov A.Yu., Blagov A.V. Some Models Parameters Calculation for Simulation of Network Traffic Marginal Distribution and Self-similarity. Madrid: 23 European conference on modeling and simulation, 2009. Pp. 18-24.
7. Благов А.В., Привалов А.Ю. Моделирование самоподобного телекоммуникационного трафика локальных сетей. Телекоммуникации, №6. М.: Наука и технологии, 2011. С. 7-13.
8. Internet Traffic Archive. URL: http://ita.ee.lbl.gov.
9. Благов А.В. Построение имитационных моделей самоподобного телекоммуникационного трафика. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва, 2011. - №2(26). С. 201-210.